

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**VITOR MARIANO CORDEIRO VIEIRA**

**Ação de Resíduo Ovino e Transposição de Galharias nos Atributos Físicos de um  
Subsolo Exposto em Processo de Recuperação**

Ilha Solteira - SP  
2025



**VITOR MARIANO CORDEIRO VIEIRA**

**Ação de Resíduo Ovino e Transposição de Galharias nos Atributos Físicos de um  
Subsolo Exposto em Processo de Recuperação**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, para  
obtenção do título de Bacharel em Ciências  
Biológicas.

Orientadora: Profa. Dra. Thais Soto Boni

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

V658a Vieira, Vitor Mariano Cordeiro.  
Ação de resíduo ovino e transposição de galharias nos atributos físicos de um subsolo exposto em processo de recuperação / Vitor Mariano Cordeiro Vieira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025  
34 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciências Biológicas) -  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2025

Orientador: Thaís Soto Boni  
Inclui bibliografia

1. Resíduos ambientais. 2. Área de empréstimo. 3. Cerrado.

Elaborada por Raiane da Silva Santos - CRB-8/9999

## ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

### **Ação de Resíduo Ovino e Transposição de Galharias nos Atributos Físicos de um Subsolo Exposto em Processo de Recuperação**

Vitor Mariano Cordeiro Vieira

#### REGULAMENTO SOBRE A AVALIAÇÃO:

ARTIGO 25º - § 2º A apresentação pública do trabalho de TCC deverá ser de no mínimo 20 (vinte) minutos e máximo de 40 (quarenta) minutos. Após um intervalo de 5 (cinco) minutos, haverá a arguição do Trabalho pelos examinadores. O tempo de arguição, será de até 15 (quinze) minutos para cada examinador, e até 15 (quinze) minutos o tempo para a resposta do(a) aluno(a) a cada examinador ou no caso de se optar pelo diálogo, o tempo conjunto entre examinador e acadêmico(a) será de no máximo 30 (trinta) minutos.

ARTIGO 24º - No julgamento do TCC, a banca examinadora deverá avaliar a apresentação oral, escrita e a defesa do trabalho durante a arguição. O conceito final será APROVADO ou REPROVADO.

#### COMISSÃO EXAMINADORA

1º EXAMINADOR (Orientador-Presidente)

Nome: Thaís Soto Boni

Documento assinado digitalmente  
 THAIS SOTO BONI  
Data: 03/12/2025 11:56:07-0300  
Verifique em <https://validar.id.gov.br>

2º EXAMINADOR

Nome: Angélica Cristina Fernandes Deus

Documento assinado digitalmente  
 ANGÉLICA CRISTINA FERNANDES DEUS  
Data: 03/12/2025 16:09:04-0300  
Verifique em <https://validar.id.gov.br>

3º EXAMINADOR

Nome: Philippe Solano Toledo Silva

Documento assinado digitalmente  
 PHILIPPE SOLANO TOLEDO SILVA  
Data: 03/12/2025 18:24:22-0300  
Verifique em <https://validar.id.gov.br>

#### CONCEITO

APROVADO

REPROVADO

Ilha Solteira-SP, 03 de dezembro de 2025.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os envolvidos, direta ou indiretamente, na realização deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Fátima Aparecida e Clodoaldo Vieira, e ao meu avô, Pedro Cordeiro, por todo o apoio durante a graduação.

Agradeço aos meus amigos que tornaram essa jornada bem mais agradável, em especial Eluana Oliveira, Viktória Babak e Matheus Vaitkevicius.

Agradeço aos membros do Laboratório de Pedologia e Recuperação Ambiental (LAPRA), por todo o auxílio durante o desenvolvimento do trabalho, com destaque para Joice Reali e Matheus Garcia.

Agradeço aos técnicos José Antonio e Silvelise Pupin por todo o apoio durante as idas a campo e na realização das análises.

Por último, agradeço à minha orientadora, Thaís Soto Boni, docente e mulher inspiradora. Bastaram poucas aulas para acender em mim a vontade de seguir nesta área, pelo que agradeço imensamente todo o conhecimento e apoio durante a construção deste trabalho.

## RESUMO

Para a recuperação de áreas degradadas com exposição do subsolo, tem-se buscado a reestruturação física como pré-requisito para o estabelecimento da vegetação. As barreiras físicas, como a compactação e as condições microclimáticas extremas, impedem a regeneração natural, exigindo intervenções que melhorem a estrutura e a retenção de água no solo. Este trabalho objetivou avaliar a recuperação dos atributos físicos de um subsolo exposto em área de empréstimo no Cerrado. A técnica adotada para recuperação, iniciada em 2017, constou de mecanização do solo (escarificação e gradagem), incorporação de composto orgânico ( $30 \text{ t ha}^{-1}$ ) e resíduo ovino ( $10 \text{ t ha}^{-1}$ ) como condicionantes, além da semeadura direta de um mix de espécies nativas e *Stylosanthes* spp., associada à transposição de galharias. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com 12 tratamentos e 4 repetições. Após sete anos das intervenções (janeiro de 2024), avaliou-se o desempenho das técnicas propostas. A avaliação do recobrimento da superfície foi realizada por análise de imagens aéreas obtidas com drone. Foram conduzidas análises físicas de densidade do solo, macro e microporosidade, resistência à penetração e velocidade de infiltração de água, além do monitoramento da temperatura e umidade do solo. De modo geral, os resultados evidenciam que as intervenções aplicadas promoveram avanços importantes, especialmente no aumento do recobrimento vegetal, com destaque para os tratamentos que combinam transposição de galharia e resíduo ovino. Contudo, variáveis como temperatura, umidade, porosidade e densidade do solo ainda revelam forte discrepância em relação ao Cerrado conservado, indicando que os processos de recomposição física e microclimática avançam mais lentamente do que a cobertura vegetal. A maior infiltração observada em alguns tratamentos — inclusive no solo exposto — e os elevados valores de resistência à penetração reforçam que a estrutura do solo permanece intensamente alterada, limitando o pleno funcionamento ecológico. Assim, embora os resultados demonstrem progressos relevantes, sobretudo na resposta da vegetação, o conjunto de atributos indica que a área ainda se encontra em fase intermediária de recuperação, demandando continuidade das ações de manejo para avançar no processo de recuperação das funções ecossistêmicas.

**Palavras-chave:** resíduos ambientais; área de empréstimo; Cerrado.

## ABSTRACT

For the recovery of degraded areas with exposed subsoil, physical restructuring has been sought as a prerequisite for the establishment of vegetation. Physical barriers, such as compaction and extreme microclimatic conditions, prevent natural regeneration, requiring interventions that improve soil structure and water retention. This study aimed to evaluate the recovery of the physical attributes of exposed subsoil in a borrow pit in the Cerrado. The recovery technique adopted, which began in 2017, consisted of soil mechanization (scarification and harrowing), incorporation of organic compost (30 t ha<sup>-1</sup>) and sheep manure (10 t ha<sup>-1</sup>) as conditioners, and direct seeding of a mix of native species and *Stylosanthes* spp., associated with the transposition of branches. The experimental design was randomized blocks with 12 treatments and 4 replicates. Seven years after the interventions (January 2024), the performance of the proposed techniques was evaluated. The assessment of surface coverage was performed by analyzing aerial images obtained with a drone. Physical analyses of soil density, macro- and microporosity, penetration resistance, and water infiltration velocity were conducted, in addition to monitoring soil temperature and moisture. Overall, the results show that the interventions applied promoted important advances, especially in increasing vegetation cover, with emphasis on treatments that combine the transposition of branches and sheep waste. However, variables such as temperature, humidity, porosity, and soil density still show a strong discrepancy in relation to the preserved Cerrado, indicating that the processes of physical and microclimatic recovery are advancing more slowly than vegetation cover. The greater infiltration observed in some treatments—including in exposed soil—and the high values of penetration resistance reinforce that the soil structure remains intensely altered, limiting full ecological functioning. Thus, although the results show significant progress, especially in the response of vegetation, the set of attributes indicates that the area is still in an intermediate stage of recovery, requiring continued management actions to advance the process of restoring ecosystem functions.

**Keywords:** environmental residue; borrow area; Cerrado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
3.1	HISTÓRICO DA ÁREA .....	14
3.2	DADOS CLIMATOLÓGICOS E GRANULOMETRIA DO SOLO .....	15
3.3	INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	16
3.4	COLETAS E ANÁLISES .....	17
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>28</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO DO MIX DE SEMENTES NATIVAS .....</b>	<b>34</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Cerrado é classificado como um dos 36 *hotspots* mundiais de biodiversidade, áreas que combinam alta endemidade de espécies e um nível crítico de ameaça (Myers *et al.*, 2000; Mittermeier *et al.*, 2011; Noss *et al.*, 2015). Este bioma abrange aproximadamente 24% do território nacional e detém uma das savanas mais ricas do planeta (Lima; Silva, 2008).

No entanto, o bioma tem sido historicamente negligenciado, com um nível de proteção legal e atenção pública muito inferior à sua real importância ecológica (Klink; Machado, 2005), visto que apenas 8,21% de seu território é legalmente protegido com unidades de conservação (Brasil, 2025). Isto resulta em um cenário de degradação aguda e contemporânea, onde o bioma responde por 61% de toda a supressão de vegetação nativa do país, tendo suas diversas fitofisionomias e habitats substituídos por áreas de pastagem e agricultura (Nunes; Castro, 2021; MAPBIOMAS, 2024).

A degradação do solo do Cerrado ocorre de forma mais severa em áreas modificadas por grandes obras de infraestrutura, a exemplo da construção de hidrelétricas. Na década de 60, durante a construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira (SP/MS), a formação da barragem exigiu que a vegetação fosse retirada, deixando o subsolo exposto, comprometendo os atributos físicos, químicos e biológicos do solo e criando assim as chamadas "áreas de empréstimo" (Alves; Souza, 2008; Boni *et al.*, 2017; Xiao *et al.*, 2024).

Dessa maneira, é fundamental implementar ações de recuperação do solo para restabelecer esse ecossistema. A adição de resíduos orgânicos, como resíduo ovino, *biochar*, subprodutos da agroindústria, tem-se mostrado eficaz para recuperar áreas degradadas. Reduzindo a amplitude térmica do solo e melhorando sua estrutura, capacidade de retenção de água, fornecimento de nutrientes e atividade microbiana (Delarmelina, 2015; Al-Wabel *et al.*, 2017; Teixeira *et al.*, 2019; Jardini *et al.*, 2023).

Uma outra técnica simples é a transposição de galharias, um método eficaz que melhora as condições para o desenvolvimento da cobertura vegetal, servindo também como abrigo para a fauna que auxilia na dispersão de sementes (Toso *et al.*, 2020). Paralelamente, a semeadura direta é uma abordagem de baixo custo que permite reintroduzir uma alta diversidade de espécies nativas (gramíneas, arbustos e árvores). Nesse processo, a rápida cobertura do solo por espécies herbáceas e arbustivas auxilia no controle de invasoras e facilita o estabelecimento das árvores de crescimento mais lento (Oliveira *et al.*, 2019; Gabriel *et al.*, 2021).

Para atestar a eficácia das práticas de recuperação adotadas, é necessário realizar um monitoramento periódico. A análise de indicadores ecológicos permite aferir, ao longo do

tempo, se a área em processo de recuperação está progredindo conforme as metas traçadas (Sartori; Coelho, 2023). Esses indicadores são comumente empregados para avaliar a qualidade do solo e são habitualmente agrupados em três categorias principais: físicos, químicos e biológicos (Sharma *et al.*, 2023).

Muitos processos do solo, como a dinâmica da água e a germinação, demonstram estar relacionados com seus atributos físicos, tais como: porosidade, densidade, umidade, infiltração da água e resistência à penetração (Rabot *et al.*, 2018; Jardini *et al.*, 2023). Esses atributos, por sua vez, influenciam e são influenciados pelo reestabelecimento da vegetação (Zhang *et al.*, 2019).

## OBJETIVO GERAL

Tendo em vista o cenário apresentado, avaliou-se o impacto de diferentes técnicas de recuperação (mecanização, composto orgânico, resíduo ovino, semeadura e galharia) na reestruturação dos atributos físicos do solo e sua relação com o restabelecimento da vegetação e do microclima em uma área de empréstimo severamente degradada.

## Objetivos Específicos

Para alcançar este objetivo, o trabalho buscou quantificar e comparar os atributos físicos do solo (densidade, porosidade, resistência à penetração,) e analisar a velocidade de infiltração da água. Objetivou também avaliar a resposta do recobrimento vegetal e do microclima (temperatura e umidade) às diferentes combinações de condicionadores. Por fim, o estudo correlaciona os atributos físicos com o recobrimento vegetal, para determinar as intervenções mais funcionais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. O PROBLEMA DO SUBSOLO EXPOSTO EM ÁREAS DEGRADADAS

Considerando a escala temporal da vida humana, o solo não é um recurso renovável, visto a necessidade de centenas de anos para a formação de poucos centímetros de solo e, para que um solo atinja sua maturidade, podem ser necessários milhares de anos (Lepsch, 2010)

Em termos mundiais, a expansão inadequada das terras agrícolas frente às áreas de vegetação natural é a principal transformação responsável pelo desencadeamento dos processos de degradação do solo (Fang; Fan 2020; Alves *et al.*, 2023). Este nível de degradação se torna extremo no caso de grandes obras de infraestrutura, como os empreendimentos hidrelétricos. A construção dessas estruturas exige uma intensa movimentação de solo e terraplenagem para a abertura de estradas, escavação de canais e estabelecimento de áreas de empréstimo. Diferente da degradação agrícola, esse processo resulta na remoção completa dos horizontes superficiais, expondo o subsolo (Brancher *et al.*, 2025).

A construção da Usina Hidrelétrica (UHE) de Ilha Solteira, um dos grandes projetos brasileiros dos anos 60, originou "áreas de empréstimo", onde o solo sofreu severa degradação, deixando subsolo exposto à superfície. Este subsolo exposto apresenta condições edáficas limitantes à regeneração natural, sendo caracterizado pela perda de nutrientes e matéria orgânica e alterações nas características de densidade, porosidade, estrutura, capacidade de infiltração e resistência mecânica à penetração (Rodrigues *et al.*, 2007; Ruiz *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2020).

Essas mudanças nos atributos físicos configuram um estado de compactação do solo, processo que consiste na reorganização das partículas em um arranjo mais denso, resultando na redução drástica do volume de vazios (Fu *et al.*, 2019). Como consequência direta dessa perda de porosidade estrutural, consolida-se o aumento significativo da densidade do solo, transformando o material em uma massa impermeável e de alta resistência mecânica (Rocha *et al.*, 2020).

Essa estrutura adensada e de baixa porosidade, característica do subsolo compactado, impacta significativamente a infiltração de água e a penetração das raízes. A capacidade de infiltração é profundamente dependente da estrutura do solo; ela é baixa em solos compactados e de alta densidade, e tende a ser alta em solos bem estruturados e com alta porosidade (Wei *et al.*, 2019). Em subsolos expostos, a ausência de macroporos funcionais cria um selamento superficial. Isso gera condições hídricas extremas que inviabilizam a vegetação, pois a baixa

infiltração provoca intenso escoamento superficial, enquanto a mínima retenção de água causa o rápido ressecamento do solo (Basset *et al.*, 2023).

A combinação de alta compactação e baixa infiltração cria um ciclo vicioso que impede a recuperação do subsolo exposto. A incapacidade da água de infiltrar um processo de erosão acelerada, removendo sementes e qualquer material orgânico que tente se estabelecer (Wei *et al.*, 2019). Além disso, a ausência de cobertura vegetal impacta diretamente os atributos físicos microclimáticos, como a temperatura e a umidade do solo. Áreas degradadas e expostas apresentam temperatura de superfície elevada e de umidade superficial do solo baixo (Silva *et al.*, 2024). Essa alta temperatura da superfície, que pode ultrapassar os limites de germinação de sementes,  $> 40^{\circ}\text{C}$ , inviabilizando a germinação e o estabelecimento inicial das plântulas, enquanto a baixa umidade impede sua sobrevivência, reforçando a perpetuação da área como um deserto físico e hídrico (Silva *et al.*, 2024).

Portanto, o subsolo exposto representa um estado de degradação severa, onde as barreiras físicas, como a compactação e a baixa infiltração (Fu *et al.*, 2019; Basset *et al.*, 2023), criam um ambiente de intensos processos erosivos e estresse microclimático. Esta área fisicamente hostil é também química e biologicamente incipiente, caracterizada pela perda de nutrientes, declínio na população microbiana e baixa ou quase ausência de matéria orgânica. Em conjunto, essas barreiras impedem a sucessão ecológica, tornando a regeneração natural inviável (Xie *et al.*, 2020) Diante disso, a restauração e reconstrução de solos degradados através de intervenções humanas ativas não é apenas uma opção, mas uma necessidade para restabelecer as funções ecossistêmicas da área.

## 2.2. TÉCNICAS PARA A RECUPERAÇÃO DE SOLOS DEGRADADOS

Em contextos de degradação extrema, como o subsolo exposto de áreas de empréstimo, a sucessão natural é severamente limitada. Nesses casos, é fundamental aplicar um conjunto de práticas integradas que sejam capazes de restaurar o ecossistema. (León *et al.*, 2021). A eficácia dessas intervenções é frequentemente avaliada por meio de indicadores físicos, como a densidade do solo, resistência à penetração, porosidade e a infiltração de água (Nantes *et al.*, 2025).

Diante de um subsolo compactado, impermeável e fisicamente inadequado, a primeira etapa da recuperação consiste em intervenções mecânicas para reverter essa condição. A escarificação do solo é uma técnica fundamental aplicada para quebrar o selamento superficial (Slim *et al.*, 2021). Esse rompimento mecânico da camada densa é essencial para melhorar os

atributos físicos primários, pois aumenta a infiltração da água e cria sulcos que mantêm a umidade. Ao alterar essa estrutura, a escarificação melhora diretamente as condições para a germinação e emergência de plântulas (Gauthier *et al.*, 2016; Slim *et al.*, 2021).

Apenas a intervenção mecânica, no entanto, não é suficiente para garantir a recuperação, pois o subsolo permanece sem matéria orgânica para estabilizar a estrutura recém-criada. Por isso, a segunda etapa crucial é o condicionamento do solo através da incorporação de condicionantes para a melhora das condições edáficas (Boni *et al.*, 2022; Zago *et al.*, 2023). O uso de resíduos orgânicos e agroindustriais é uma alternativa que visa suprir a matéria orgânica inexistente. A adição desses resíduos é fundamental, pois devolve ao solo, nutrientes, matéria orgânica, além de favorecer a sua estruturação física, criando condições para o desenvolvimento inicial da vegetação (Fardin *et al.*, 2021; Kacprzak *et al.*, 2022; Malone *et al.*, 2023; Zago *et al.*, 2023). A aplicação do resíduo ovino em áreas severamente degradadas beneficia a sucessão ecológica ao elevar o pH, a CTC e a matéria orgânica do solo. Essa melhoria química estimula o desenvolvimento de biomassa vegetal e recupera a fertilidade em solos compactados (Teixeira *et al.*, 2019).

Além das intervenções diretas no solo, a recuperação de áreas expostas pode ser acelerada por técnicas que facilitam a sucessão ecológica, como a transposição de galharia. Esta abordagem consiste na alocação de pilhas de resíduos florestais para a área, que cria novos habitats e melhora as condições físicas do solo. O principal benefício físico direto é a criação de um microclima favorável: os galhos atuam como um abrigo contra o aquecimento solar excessivo e condicionam um maior acúmulo de umidade no solo, facilitando a germinação (Escrivà *et al.*, 2019; Toso *et al.*, 2020).

Enquanto a galharia oferece proteção passiva, a semeadura direta é uma técnica de revegetação ativa crucial para a reabilitação da fertilidade do solo. (Dridiger *et al.*, 2020). Além disso, a principal vantagem da semeadura direta é permitir que a raiz cresça livremente, sem os danos ou deformações comuns em mudas de viveiro. Com um sistema radicular intacto e profundo, a planta consegue acessar mais água e ajuda a abrir os poros do solo, o que é fundamental para recuperar a infiltração e a estrutura do solo (Palma; Laurance 2015; Leverkus *et al.*, 2021)

### 2.3. ATRIBUTOS FÍSICOS NO MONITORAMENTO DA RECUPERAÇÃO

O sucesso de um projeto de recuperação não pode ser medido apenas pela recuperação da vegetação, pois os processos ecossistêmicos em solos degradados podem não ser capazes de sustentar essa vegetação a longo prazo, o objetivo principal deve ser restabelecer as funções e

serviços do ecossistema do solo, que são necessários para sustentar essa vegetação. Portanto, a seleção de indicadores de solo apropriados é essencial para avaliar adequadamente a recuperação da qualidade do solo (Muñoz-Rojas., 2018; Lehmann *et al.*, 2020; Saavedra *et al.*, 2023).

Os indicadores físicos são fundamentais para avaliar a reestruturação de solos severamente degradados. Nesses solos, a recuperação da estrutura é a principal barreira. Por isso, recomenda-se um conjunto mínimo de dados físicos para monitorar a recuperação, que inclui densidade, infiltração e resistência à penetração (Rocha *et al.*, 2020; Nuñez-Peñaloza *et al.*, 2023).

Entre os atributos físicos, a densidade do solo e a porosidade total são indicadores primários da qualidade estrutural, pois refletem diretamente a compactação e a redução de poros que dificulta o estabelecimento da cobertura vegetal (Maurya *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2024).

Complementarmente, a resistência à penetração é a metodologia mais utilizada e bastante eficiente na localização e quantificação de camadas de solo adensadas (Silva *et al.*, 2020). Este indicador é importante por sua correlação com o desenvolvimento radicular. Em solos compactados, a alta resistência à penetração impede o acesso das raízes à água, mesmo que esta esteja presente no solo (Benevenuto *et al.*, 2020).

Áreas degradadas apresentam uma clara "tendência a compactação" Em contraste, áreas de floresta preservada apresentam menor densidade e maior porosidade, o que sugere uma estrutura menos compactada, com maior capacidade de retenção de água e melhor aeração, a recuperação da estrutura física está diretamente ligada à restauração da função hidrológica do solo (Silva *et al.*, 2024).

A taxa de infiltração de água é um indicador-chave da qualidade do solo, pois é influenciada pela estrutura, ou seja, pelo arranjo dos agregados e poros (Basset *et al.*, 2023). Em solos degradados e compactados (como o subsolo exposto), a ausência de uma estrutura estável e de macroporos funcionais impede a entrada de água, levando ao aumento do escoamento superficial e da erosão.

Analisar apenas a estrutura do solo não é suficiente para uma avaliação eficaz das características de infiltração, sendo a medição direta da infiltração um indicador mais robusto da recuperação funcional do solo (Basset *et al.*, 2023; Farias *et al.*, 2024).

Além da estrutura interna (densidade, porosidade), o estado da superfície do solo é um indicador físico essencial, especialmente em relação ao microclima que afeta diretamente a revegetação. Áreas degradadas e expostas apresentam, caracteristicamente, baixos níveis de umidade superficial e temperatura de superfície elevada. Esta alta temperatura (que pode

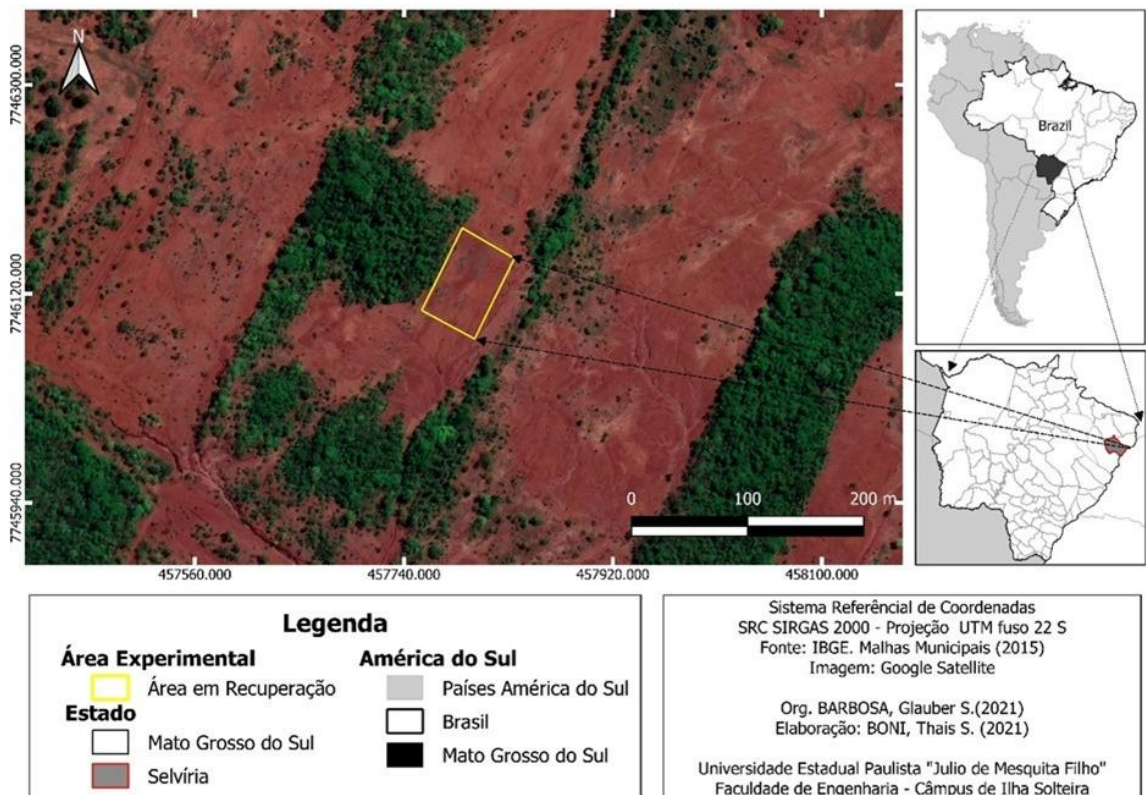
exceder 40-45°C) é uma barreira física direta, pois ultrapassa o limiar de germinação para muitas sementes (aprox. 35°C), enquanto a baixa umidade impede a sobrevivência das plântulas que conseguem emergir (Silva *et al.*, 2024).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 HISTÓRICO DA ÁREA

O estudo foi conduzido em condições de campo, em uma área severamente degradada localizada no bioma Cerrado. A área experimental foi estabelecida em novembro/2017, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Unesp/Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira, situada no município de Selvíria/MS (Figura 1). Neste local, os horizontes superficiais do solo (A e B) foram removidos na década de 1960, para a construção da barragem da UHE de Ilha Solteira, expondo o subsolo. Sob essas condições, a regeneração natural não ocorreu.

**Figura 1.** Mapa de localização da área experimental, em Selvíria/MS.

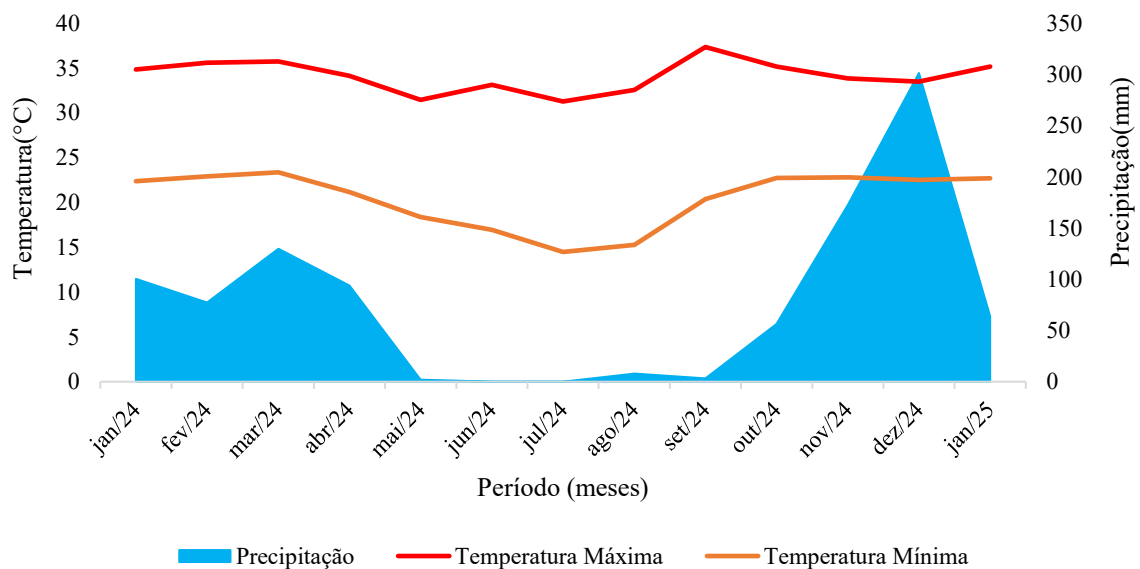


Fonte: Google Earth (2021).

### 3.2 DADOS CLIMATOLÓGICOS E GRANULOMETRIA DO SOLO

A altitude média na região é de 335 m, o clima foi classificado como Aw (clima tropical com verão chuvoso e inverno seco), segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 23,7 °C e precipitação média anual de 1.300 mm, dados do ano de avaliações e análises estão apresentados na Figura 2.

**Figura 2.** Dados médios de Temperatura Máxima e Mínima (°C) e Precipitação (mm) observados durante o ano de avaliações (janeiro/2024 a janeiro/2025).



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com mapas de solos, o solo da região circundante à área experimental é classificado em maior parte como Latossolos e Argissolos Vermelhos Distróficos (Embrapa, 2011). A caracterização granulométrica da área experimental (AE) e da área de referência - Cerrado Conservado (CC) está apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição granulométrica do solo e classe textural da Área Experimental (AE) e do Cerrado Conservado (CC).

	Argila	Areia	Silte	Textura
	-----g kg <sup>-1</sup> -----			
AE	472	404	124	Argilo Siltosa
CC	335	627	38	Franco Argilo Siltosa

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

Para estimular a recuperação da área, em novembro/2017, o solo foi preparado com grade pesada (0,37 m de profundidade), seguida de escarificação (0,25 m de profundidade) para romper o selamento superficial e revolvimento. Além disso, incorporou-se ao solo uma dose equivalente a 30 t ha<sup>-1</sup> de composto orgânico, produzido a partir de folhas e resíduos de poda, visando aumentar o teor de matéria orgânica.

Os tratamentos contaram ainda com a adição de 10 t ha<sup>-1</sup> de Resíduo Ovino (Rov), com a introdução de sementes de 35 espécies nativas - 22 arbóreas, 9 arbustivas, três herbáceas e uma palmeira – (APÊNDICE A). Além destas sementes, foi semeado na área o estilosantes campo grande (*Stylosanthes capitata* Vogel (80 %) e (*S. macrocephala* M.B.Ferreira & Sousa Costa (20 %)), espécies subarbustivas fixadoras de nitrogênio e de ocorrência no Cerrado, seguindo recomendação comercial (3 kg sementes ha<sup>-1</sup>).

Para auxiliar na contenção da erosão, diminuir a intensidade da radiação solar à superfície e para atuar como abrigo para pequenos animais, galhos secos foram depositados à superfície, em uma operação denominada transposição de galharia, quando galhos secos de árvores, encontrados no chão em remanescentes de Cerrado existentes nas proximidades, ou galhos oriundos da poda de árvores, foram distribuídos na superfície. A galharia foi distribuída sobre as parcelas de maneira a produzir recobrimento superficial de 12% nas parcelas de 25 m<sup>2</sup>.

Esses componentes combinados produziram 12 tratamentos (Quadro 1), dispostos em blocos casualizados, em parcelas de 5 x 5 m (25 m<sup>2</sup>), com 4 repetições.

**Quadro 1.** Descrição dos tratamentos utilizados.

Identificação dos tratamentos	Descrição
T1	CTL Controle (CTL)
T2	M Solo Mecanizado (MCZ - M)
T3	MC MCZ + Composto Orgânico (Comp - C)
T4	MCS MCZ + Comp + Mix de sementes (Smt - S)
T5	MCE MCZ + Comp + <i>Stylosanthes</i> spp. (Est - E)
T6	MCR MCZ + Comp + Resíduo Ovino (Rov - R)
T7	MCSE MCZ + Comp + Smt + Est
T8	MCSR MCZ + Comp + Smt + Rov
T9	MCER MCZ + Comp + Est + Rov
T10	MCSER MCZ + Comp + Smt + Est + Rov
T11	MCSEG MCZ + Comp + Smt + Est + Galharia (Galh - G)
T12	MCSERG MCZ + Comp + Smt + Est + Rov + Galh

CTL = Controle, Mcz = Solo Mecanizado, Comp = Composto Orgânico, Smt = Mix de sementes nativas, Est = *Stylosanthes* spp., Rov = Resíduo ovino, Galh = Galharia.

### 3.4 COLETAS E ANÁLISES

Após sete anos das intervenções iniciais, em janeiro de 2024, foram iniciadas as análises para monitorar a evolução do processo de recuperação da área degradada. Nesse período, foram avaliados os atributos físicos do solo e a evolução da cobertura vegetal.

O solo da área experimental foi avaliado quanto a densidade, porosidade, macro e micro porosidade, umidade e análise granulométrica do solo (Teixeira *et al.*, 2017); temperatura do solo (Costa; Godoy., 1962) velocidade de infiltração de água, determinada pelo método do mini infiltrômetro de disco (Zhang., 1997), resistência ao solo a penetração, com penetrômetro de impacto (Nimmo; Perkins., 2002).

**Figura 3.** Amostras na mesa de tensão (A) avaliação de infiltração de água (B).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a determinação da densidade, macro e micro porosidade, foram coletadas amostras com o auxílio de anel de Kopecky na camada de 0-0,10 m. Estas análises foram realizadas pelo método do anel volumétrico, combinado com a mesa de tensão (Teixeira *et al.*, 2017).

Em campo, a velocidade de infiltração da água foi avaliada pelo método do mini infiltrômetro de disco (Zhang, 1997). Foram realizadas duas repetições em pontos distintos por parcela. O monitoramento da infiltração acumulada foi conduzido por 5 minutos em cada

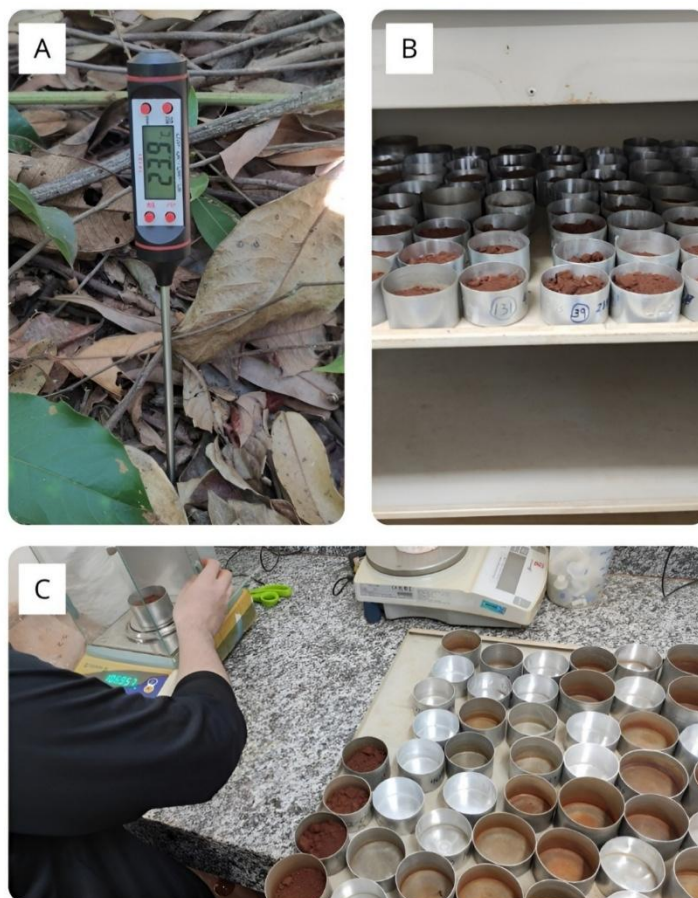
repetição, registrando-se os valores de volume infiltrado em intervalos de 30 segundos. Esses dados foram utilizados para o cálculo da taxa de infiltração.

A temperatura do solo foi mensurada por meio do uso de sensores, e as medidas foram realizadas ao amanhecer (7:30h) e a tarde (15h), na profundidade de 0,05 m, com 04 repetições por parcela (Costa; Godoy, 1962).

A umidade do solo também foi avaliada por gravimetria (0 a 0,05 m), com 3 repetições por parcela (Teixeira *et al.*, 2017).

A resistência mecânica do solo à penetração foi determinada com o uso de um penetrômetro de impacto, foram realizados cinco impactos consecutivos, verificando o deslocamento vertical da haste no perfil do solo para o cálculo da resistência (Nimmo; Perkins, 2002).

**Figura 4.** Medidas de temperatura em campo (A), secagem de solo na estufa (B), pesagem das amostras de solo (C).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A avaliação da cobertura do solo por vegetação foi realizada por meio de imagens aéreas obtidas com auxílio de drone modelo DJI Mini 2 SE (câmera de 12MP), em voo a uma altura de 18 m, para acompanhar o processo de crescimento e estabelecimento da vegetação.

**Figura 5.** Visão aérea da área experimental em fevereiro de 2024.



Fonte: Laboratório de Pedologia – Unesp/FEIS.

A partir das imagens registradas foi possível estimar a porcentagem da área de cada parcela experimental recoberta por vegetação, análise feita utilizando o software APS ASSESS 2.0 (Lamari, 2008).

Os resultados obtidos foram avaliados por meio de análises de variância (ANOVA), para o comparativo das médias dos tratamentos da área experimental (AE), utilizou-se o teste de médias Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), realizado no software SISVAR (Ferreira, 2019). Para comparação entre os tratamentos da AE em relação ao Cerrado conservado (CC), aplicou-se o teste de Dunnett ( $p < 0,05$ ), através da linguagem estatística R (R Core Team, 2025), utilizando o software RStudio.

#### 4 RESULTADOS

A análise de variância revelou diferenças significativas para o recobrimento do solo por vegetação entre os tratamentos ( $p < 0,001$ ). O tratamento Controle (CTL) não apresentou recobrimento vegetal (0,0%), agrupado juntamente com os tratamentos M, MC e MCE, cujas médias variaram entre 2,7, 2,9 e 3,7%, respectivamente (Tabela 2).

Em contrapartida, os tratamentos que associaram a transposição de galharia a outras técnicas de manejo destacaram-se com os percentuais médios de cobertura do solo, compostos pelos tratamentos MCSERG e MCSEG, com 47,3% e 36,8%, respectivamente. Os tratamentos que receberam o mix de sementes e resíduo ovino, MCSER e MCSR, apresentaram valores intermediários de cobertura (24,2 e 19,8%, respectivamente), indicando um gradiente de resposta da vegetação à intensidade das intervenções.

**Tabela 3.** Valores médios para recobrimento do solo por vegetação (REC) entre os tratamentos avaliados, valor de  $p$  e coeficiente de variação (CV).

Tratamentos	REC
	%
CTL	0,0 d
M	2,7 d
MC	2,9 d
MCS	9,3 c
MCE	3,7 d
MCR	9,1 c
MCSE	11,8 c
MCSR	19,8 c
MCER	9,1 c
MCSER	24,2 b
MCSEG	36,8 a
MCSERG	47,3 a
<b><math>p</math> valor</b>	<0,001
<b>CV (%)</b>	52

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ( $p > 0,05$ ).

A variação de temperatura ( $\Delta T$ ) e umidade do solo (UMI) não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos da área experimental - AE (Tabela 4). No entanto, quando comparamos os tratamentos da AE com o Cerrado conservado (CC), todos os tratamentos na AE apresentaram valores de variação térmica superiores ao CC, diferindo significativamente pelo teste de Dunnett ( $p < 0,01$  ou  $p < 0,001$ ). Esses valores oscilaram entre 9,58 °C (MCSE) e 13,85 °C (MCER), enquanto na área de Cerrado conservado a oscilação de temperatura foi em média 2,25 °C.

Quanto à UMI, observou-se uma diferença acentuada entre a área de referência e as áreas em recuperação. O CC registrou umidade média de 25,29%, valor muito superior a todos os tratamentos experimentais, que diferiram estatisticamente da referência ( $p < 0,001$ ).

**Tabela 4.** Valores médios para variação de temperatura ( $\Delta T$ ) e umidade (UMI) entre os tratamentos avaliados, valor de  $p$  e coeficiente de variação (CV).

Tratamentos	$\Delta T$	UMI
	°C	%
CC	2,25 ± 0,66	25,29 ± 2,55
CTL	13,33 ± 1,27*** a	0,96 ± 0,23*** a
M	11,25 ± 4,79** a	1,79 ± 1,16*** a
MC	12,44 ± 4,03*** a	1,69 ± 1,04*** a
MCS	13,46 ± 3,13*** a	1,51 ± 0,83*** a
MCE	12,64 ± 1,62*** a	1,67 ± 0,62*** a
MCR	12,59 ± 3,44*** a	1,83 ± 0,81*** a
MCSE	9,58 ± 4,66** a	1,26 ± 0,42*** a
MCSR	12,45 ± 3,68*** a	1,57 ± 0,77*** a
MCER	13,85 ± 3,04*** a	1,55 ± 0,84*** a
MCSER	10,59 ± 2,14** a	1,58 ± 1,25*** a
MCSEG	10,31 ± 3,83*** a	1,80 ± 0,60*** a
MCSERG	11,09 ± 4,46*** a	2,69 ± 1,76*** a
<b><math>p</math> valor</b>	0,2829	0,0784
<b>CV (%)</b>	31	58

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ( $p > 0,05$ ). \* = diferenças significativas entre as médias de cada tratamento e a média do controle (CC) pelo teste de Dunnett ( $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$ ; \*\*).

Para a análise de porosidade do solo (macro, micro e total), não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos da AE, bem como entre esses tratamentos e a porosidade do solo do CC (Tabela 5).

**Tabela 5.** Valores médios de macroporosidade (MACRO), microporosidade (MICRO), porosidade total (TOTAL) entre os tratamentos avaliados, valor de  $p$  e coeficiente de variação (CV).

Tratamentos	MACRO	MICRO	TOTAL
	%	%	%
CC	17,7 ± 3,5	24,9 ± 1,2	42,6 ± 2,5
CTL	11,13 ± 3,73 a	29,10 ± 9,33 a	40,23 ± 5,73 a
M	13,00 ± 3,69 a	29,73 ± 7,50 a	42,68 ± 4,10 a
MC	11,90 ± 4,00 a	32,54 ± 2,76 a	44,44 ± 3,28 a
MCS	11,50 ± 4,27 a	31,88 ± 6,20 a	43,40 ± 3,41 a
MCE	12,53 ± 3,75 a	33,34 ± 2,86 a	45,86 ± 3,71 a
MCR	13,23 ± 4,40 a	29,38 ± 4,78 a	42,60 ± 8,37 a
MCSE	10,90 ± 4,44 a	32,45 ± 2,15 a	43,34 ± 3,56 a
MCRS	14,58 ± 4,57 a	29,56 ± 7,94 a	44,14 ± 5,94 a
MCER	10,86 ± 3,88 a	33,63 ± 3,53 a	44,50 ± 3,82 a
MCSER	12,25 ± 3,51 a	31,46 ± 6,37 a	43,73 ± 7,52 a
MCSEG	16,68 ± 4,90 a	27,23 ± 5,92 a	43,91 ± 5,55 a
MCSERG	15,54 ± 5,92 a	30,34 ± 6,34 a	45,90 ± 3,53 a
<b><math>p</math> valor</b>	0,0447	0,2928	0,8098
<b>CV (%)</b>	34	18	11

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott para  $p < 0,05$ .

Em relação à densidade do solo ( $D_s$ ), a comparação entre os tratamentos da AE não indicou diferenças significativas entre eles ( $p = 0,1221$ ). Ainda assim, observa-se que o tratamento Controle (CTL) apresentou a maior média de densidade ( $1,68 \text{ g cm}^{-3}$ ), enquanto os tratamentos submetidos às técnicas de recuperação (M a MCSERG) exibiram valores entre  $1,38$  e  $1,54 \text{ g cm}^{-3}$  (Tabela 6).

Na comparação com o CC, apenas o CTL diferiu estatisticamente ( $p < 0,05$ ), com densidade de  $1,40 \text{ g cm}^{-3}$  no CC e  $1,68 \text{ g cm}^{-3}$  no tratamento controle, onde não foram realizadas intervenções para recuperação.

**Tabela 6.** Valores médios de densidade do solo (Ds) entre os tratamentos avaliados, valor de  $p$  e coeficiente de variação (CV).

Tratamentos	Ds
	g cm <sup>-3</sup>
CC	1,40 ± 0,08
CTL	1,68 ± 0,10 * a
M	1,45 ± 0,13 a
MC	1,50 ± 0,09 a
MCS	1,54 ± 0,07 a
MCE	1,43 ± 0,12 a
MCR	1,54 ± 0,21 a
MCSE	1,54 ± 0,07 a
MCRS	1,50 ± 0,14 a
MCER	1,50 ± 0,11 a
MCSER	1,50 ± 0,20 a
MCSEG	1,47 ± 0,13 a
MCSERG	1,38 ± 0,11 a
<b><i>p</i> valor</b>	0,1221
<b>CV (%)</b>	9

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott para  $p < 0,05$ . \* = diferenças significativas entre as médias de cada tratamento e a média do controle (CC) pelo teste de Dunnett ( $p < 0,05$ )

A infiltração de água acumulada apresentou diferença estatística entre os tratamentos da AE (Tabela 7). O grupo com maiores taxas de infiltração incluiu CTL, MC, MCSE, MCRS, MCER, MCSEG e MCSERG, enquanto M, MCS, MCE, MCR e MCSER compuseram o grupo de menores valores.

Quando comparamos os tratamentos da AE com o Cerrado Conservado (CC), observou-se que M, MCS, MCE e MCR não diferiram estatisticamente da área de referência. Já os

tratamentos do grupo de maior infiltração, incluindo o solo exposto (CTL), apresentaram valores significativamente superiores ao CC ( $p < 0,05$  a  $p < 0,001$ ). O tratamento CTL registrou o maior valor do experimento ( $529,10 \text{ mm h}^{-1}$ ), enquanto o CC apresentou infiltração média de  $152,79 \text{ mm h}^{-1}$ .

**Tabela 7.** Valores médios para infiltração de água acumulada (INF) entre os tratamentos avaliados, valor de  $p$  e coeficiente de variação (CV).

Tratamentos	INF
	mm h <sup>-1</sup>
CC	152,79 ± 123,73
CTL	529,10 ± 171,18*** b
M	306,99 ± 186,60 a
MC	423,47 ± 200,95*** b
MCS	270,51 ± 163,81 a
MCE	323,71 ± 167,31 a
MCR	323,03 ± 191,99 a
MCSE	409,80 ± 151,10*** b
MCRS	395,65 ± 175,14** b
MCER	389,74 ± 150,41** b
MCSER	362,73 ± 135,42* a
MCSEG	407,58 ± 181,96*** b
MCSERG	437,62 ± 157,00*** b
<b><i>p</i> valor</b>	0,0161
<b>CV (%)</b>	44

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott para  $p < 0,05$ . \* = diferenças significativas entre as médias de cada tratamento e a média do controle (CC) pelo teste de Dunnett ( $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$ ; \*\*;  $p < 0,05$ ; \*).

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) diferiu estatisticamente entre os tratamentos da AE (Tabela 8). O solo exposto (CTL) apresentou o maior valor médio (5,93 MPa), apresentando isoladamente o grupo de maior resistência. Tratamentos como MC, MCS, MCR e MCSER formaram o grupo intermediário, enquanto M, MCE, MCSE, MCRS, MCER, MCSEG e MCSERG apresentaram as menores resistências.

Na comparação com o CC, apenas o tratamento M não diferiu estatisticamente da referência pelo teste de Dunnett. Todos os demais tratamentos apresentaram valores significativamente superiores ao CC ( $p < 0,05$  a  $p < 0,001$ ). O CC registrou RP média de 2,24 MPa, enquanto os tratamentos da AE variaram entre 2,44 MPa (M) e 5,93 MPa (CTL).

**Tabela 8.** Valores médios para resistência à penetração (RP) entre os tratamentos avaliados, valor de  $p$  e coeficiente de variação (CV).

Tratamentos	RP
	MPa
CC	2,24 ± 0,19
CTL	5,93 ± 1,35*** c
M	2,44 ± 0,32 a
MC	3,20 ± 0,90** b
MCS	3,28 ± 0,73** b
MCE	3,00 ± 0,45 a
MCR	3,56 ± 0,54*** b
MCSE	2,91 ± 0,46 a
MCRS	2,86 ± 0,58 a
MCER	3,06 ± 0,46* a
MCSER	3,58 ± 1,28*** b
MCSEG	3,02 ± 0,77* a
MCSERG	2,75 ± 0,28 a
<b><math>p</math> valor</b>	<0,001
<b>CV (%)</b>	22

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott para  $p < 0,05$ . \* = diferenças significativas entre as médias de cada tratamento e a média do controle (CC) pelo teste de Dunnett (\* para  $p < 0,05$ ; \*\* para  $p < 0,01$ ; \*\*\* para  $p < 0,001$ ).

## 5 DISCUSSÃO

O recobrimento do solo por vegetação demonstrou ser sensível aos diferentes condicionantes empregados na recuperação do subsolo exposto. A ausência de recobrimento no tratamento Controle (CTL) e nos tratamentos com menor intensidade de intervenção (M, MC, MCE) confirma que a regeneração natural nessas condições edáficas extremas é severamente limitada, explicada pela baixa resiliência em áreas de empréstimo (Alves; Souza, 2008).

Por outro lado, os tratamentos que receberam a transposição de galharia (MCSEG e MCSERG) apresentaram os maiores índices de cobertura do solo. Isso ocorre porque a galharia reduz a exposição do solo, retém mais umidade, criando microhabitats protegidos que favorecem a germinação e o estabelecimento de plântulas (Escrivà *et al.*, 2019). A presença de resíduos orgânicos (resíduo ovino) nestes tratamentos também foi determinante, fornecendo o suporte inicial necessário para o desenvolvimento da vegetação sob condições edáficas incipientes (Zago *et al.*, 2023).

Embora a análise estatística não tenha detectado diferenças significativas entre os tratamentos da AE para a variação de temperatura e umidade, a comparação com a área de referência (CC) revela o grau de severidade do ambiente em recuperação. A amplitude térmica média na área experimental foi significativamente superior à amplitude térmica do Cerrado Conservado. Essa elevada oscilação de temperatura na superfície dos tratamentos menos vegetados atua como um fator de estresse físico, comprometendo a viabilidade de sementes e a sobrevivência da vegetação em fase inicial (Silva *et al.*, 2024)

A relação entre cobertura e umidade também foi evidente. O solo exposto do tratamento Controle (CTL) apresentou a menor umidade (0,96%), diferindo drasticamente da área conservada (25,29%). A baixa retenção de água no solo exposto reforça o ciclo de degradação, onde a falta de umidade impede a vegetação, e a falta de vegetação e matéria orgânica impede a retenção de água (Farias *et al.*, 2024). Entretanto, observa-se uma tendência de melhoria nos tratamentos mais complexos, como o MCSERG, que apresentou a maior média de umidade entre os tratamentos da AE. Isso sugere que a combinação do uso de galharia e a adição do resíduo ovino (matéria orgânica) estão iniciando, ainda que lentamente, o restabelecimento da capacidade de retenção hídrica do solo.

Os resultados de porosidade total, macroporosidade e microporosidade indicaram uma homogeneidade estatística entre todos os tratamentos e o Cerrado conservado (CC). No entanto, a densidade do solo revelou-se um indicador mais responsivo para avaliar o estado de degradação. O tratamento Controle (CTL) foi o único a apresentar densidade significativamente

superior ( $1,68 \text{ g cm}^{-3}$ ) em relação à área de referência ( $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ ), confirmando o diagnóstico de compactação severa no solo exposto sem manejo. Em solos argilosos, densidades acima de  $1,4$  a  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$  são consideradas críticas, impedindo o desenvolvimento radicular (Reichert *et al.*, 2003).

Com isso, todos os tratamentos submetidos às técnicas de recuperação (desde a mecanização isolada até as associações mais complexas com resíduos e galharia) apresentaram valores de densidade estatisticamente semelhantes à área de Cerrado Conservado. Isso indica que as intervenções realizadas, a escarificação e subsolagem iniciais, seguidas pela introdução de matéria orgânica, foram eficazes em reverter a compactação excessiva, promovendo uma redução da densidade que aproximou estes atributos aos níveis naturais da vegetação nativa (Boni *et al.*, 2022; Nantes *et al.*, 2025).

A resistência à penetração (RP) reafirmou o diagnóstico de degradação física severa no solo exposto (CTL), que registrou média de  $5,93 \text{ MPa}$ , valor muito superior ao de  $2,0 \text{ MPa}$  de limite estabelecido para o crescimento radicular (Taylor *et al.*, 1966; Benevenuto *et al.*, 2020). O tratamento onde houve apenas a mecanização (M) foi o único a atingir valores de resistência ( $2,44 \text{ MPa}$ ) estatisticamente semelhantes à área de referência (CC), demonstrando que a descompactação física inicial foi bem-sucedida em romper as camadas adensadas. Os demais tratamentos, embora superiores estatisticamente ao CC, mantiveram-se na faixa de  $2,75$  a  $3,58 \text{ MPa}$ , o que representa uma melhoria substancial em comparação ao subsolo exposto, permitindo a exploração das primeiras camadas de solo pelas raízes (Silva *et al.*, 2020).

Em relação à capacidade de infiltração de água, houve respostas distintas entre os tratamentos analisados. Contudo, o solo exposto (CTL) apresentou a maior taxa de infiltração de todo o experimento, significativamente superior à da área de referência. Esse resultado, aparentemente contraditório para um solo compactado, é característico de solos degradados e secos, onde a formação de fendas e rachaduras superficiais favorece o fluxo preferencial de água (Basset *et al.*, 2023)

Por outro lado, os tratamentos que apresentaram melhores atributos físicos e cobertura (como M, MCS, MCE e MCR) registraram taxas de infiltração estatisticamente semelhantes à área de Cerrado Conservado. Isso sugere o restabelecimento de uma infiltração mais lenta e funcional, onde a água é absorvida pelos poros do solo e retida. Portanto, a redução da velocidade de infiltração nesses tratamentos, aproximando-se da referência, deve ser interpretada como um indicador de recuperação da funcionalidade hidrológica e da qualidade estrutural do solo (Basset *et al.*, 2023).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os atributos físicos do solo apresentaram tendências positivas nos tratamentos submetidos às técnicas de recuperação, especialmente quando comparados ao solo exposto sem intervenção. A redução da densidade e os menores valores de resistência à penetração, observados no tratamento MCSERG, foram semelhantes aos observados no Cerrado Conservado, indicando que as práticas aplicadas foram eficazes em reverter parcialmente a compactação severa e restabelecer condições mínimas para o desenvolvimento do sistema radicular. Esses resultados reforçam o papel das variáveis físicas como indicadores sensíveis e eficientes para monitorar o avanço da recuperação em áreas de subsolo exposto.

De forma integrada, os resultados demonstram que o modelo de recuperação adotado favoreceu a reestruturação física do solo, a melhora do microclima e o aumento do recobrimento vegetal. Embora a área ainda se encontre em estágio intermediário de recuperação, os avanços registrados reforçam a importância do manejo integrado, adição de matéria orgânica e proteção física da superfície com as galharias, como estratégia promissora para a recuperação de ambientes severamente degradados.

## REFERÊNCIAS

- AL-WABEL, M. *et al.* Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 28, p. 1-38, 2017.
- ALVES, E. A. C. *et al.* Degradação dos solos: impactos ambientais e metodologias de análise. **Revista Territorium Terram**, Cuiabá, MT, v. 6, n. 8, p. 31-41, 2023.
- ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. de. Recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2505-2516, 2008.
- BASSET, C. *et al.* How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 226, p. 105577, 2023.
- BENEVENUTE, P. A. N. *et al.* Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 117, p. 106647, 2020.
- BONI, T. S. *et al.* Biomass residues improve soil chemical and biological properties reestablishing native species in an exposed subsoil in Brazilian Cerrado. *PloS one*, v. 17, n. 6, p. e0270215, 2022.
- BONI, T. S. *et al.* Chemical soil attributes of Cerrado areas under different recovery managements or conservation levels. **International Journal of Biodiversity and Conservation**, Nairobi, v. 9, n. 5, p. 115-121, 2017.
- BONI, T. S. *et al.* *Xylopia aromatica*: crescimento inicial e status nutricional de mudas em solo degradado condicionado com resíduos. **Research, Society and Development**, Várzea Grande, v. 11, n. 6, p. e59211628582, 2022.
- BRANCHER, B. P. *et al.* Principais impactos ambientais e análise exploratória do novo índice de degradação ambiental para licenciamento de centrais geradoras hidrelétricas no Paraná. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, Curitiba, PR, v. 14, n. 03, p. 726-752, 2025.
- CASTILLO-ESCRIVÀ, A. *et al.* The use of branch piles to assist in the restoration of degraded semiarid steppes. **Restoration Ecology**, Hoboken, NJ, v. 27, n. 2, p. 408-414, 2019.
- COSTA, A. O. I.; GODOY, H. Contribuição para conhecimento do clima e do solo de Ribeirão Preto. **Bragantia**, Campinas, v. 21, p. 689-742, 1962.

- DELARMELINA, W. C. *et al.* Uso de resíduo orgânico em substrato para produção de *Chamaecrista desvauxii* (Collad.) Killip var. *latistipula* (Benth.). **CERNE**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 429-437, 2015.
- EMBRAPA. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2011.
- FANG, H.; FAN, Z. Assessment of Soil Erosion at Multiple Spatial Scales Following Land Use Changes in 1980–2017 in the Black Soil Region, (NE) China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 20, p. 1-19, 2020.
- FARDIN, F. H. *et al.* Restauração ecológica de subsolo exposto condicionado com resíduos no Cerrado. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 49, n. 130, p. e3452, 2021.
- FARIAS, E. S. B. *et al.* Dinâmica temporal da umidade do solo em área degradada e manejada de região semiárida determinada pelos métodos da estufa e forno elétrico. **Revista DELOS**, Curitiba, v. 17, n. 61, p. 01-23, 2024.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, Lavras, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.
- FU, Y. *et al.* Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 193, p. 114-121, 2019.
- GABRIEL, A. W. *et al.* Semeadura Direta para Restaurar Savanas Neotropicais: uma Alternativa para Adequação Ambiental no Cerrado. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, DF, v. 12, n. 1, p. 88-103, 2022.
- GARCÍA-RUIZ, J. M. *et al.* A meta-analysis of soil erosion rates across the world. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 239, p. 160-173, 2015.
- GATICA-SAAVEDRA, P. *et al.* Soil health indicators for monitoring forest ecological restoration: a critical review. **Restoration Ecology**, Hoboken, NJ, v. 31, n. 5, p. e13836, 2023.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - ICMBio. **Cerrado**. Brasil, 2025.
- JARDINI, D. C. *et al.* Atributos físicos e químicos de um latossolo submetido a fontes e doses de resíduos agroindustriais. **CONNECTION - Revista Eletrônica do UNIVAG**, Cuiabá, MT, v. 9, n. 1, p. 1-13, 2023.
- KACPRZAK, M. *et al.* Bio-based waste' substrates for degraded soil improvement – Advantages and challenges in European context. **Energies**, v. 15, n. 1, p. 385, 2022.
- KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **MEGADIVERSIDADE**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 147-155, 2005.
- LAMARI, L. ASSESS 2.0: image analysis software for disease quantification. Saint Paul: APS, 2008.

LEHMANN, J. *et al.* The concept and future prospects of soil health. **Nature Reviews Earth & Environment**, Londres, v. 1, p. 544-553, 2020.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 334p.

LEVERKUS, A. B. *et al.* Seeding or planting to revegetate the world's degraded land: systematic review and experimentation to address methodological issues. **Restoration Ecology**, Hoboken, NJ, v. 29, n. 4, p. e13372, 2021.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Recursos Hídricos do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília: EMBRAPA-CERRADOS, 2008. v. 1, p. 91.

MALONE, Z.; BERHE, A. A.; RYALS, R. Impacts of organic matter amendments on urban soil carbon and soil quality: A meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 419, p. 138148, 2023.

MAPBIOMAS. **Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2023**. São Paulo, Brasil: MapBiomass, 2024. 154 p.

MAURYA, S. *et al.* Indicators for assessment of soil quality: a mini-review. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 192, p. 604, 2020.

MITTERMEIER, R. A. *et al.* Chapter 1: Global Biodiversity Conservation: The Critical Role of Hotspots. In: ZACHOS, F. E.; HABEL, J. C. (Eds.). **Biodiversity Hotspots: Distribution and Protection of Conservation Priority Areas**. Berlim: Springer, 2011. p. 3–22.

MUÑOZ-ROJAS, M. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, Amsterdam, v. 5, p. 47-52, 2018.

MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, Londres, v. 403, p. 853–858, 2000.

NANTES, L. S. *et al.* Exposed Subsoil Under Recovery for 30 Years: Influence of Management Strategies on Soil Physical Attributes and Organic Matter. **Soil Systems**, Basel, v. 9, p. 17, 2025.

NIMMO, J. R.; PERKINS, K. S. Aggregate stability and size distribution. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of soil analysis: Part 4 - Physical methods**. Madison: SSSA, 2002. p. 317-328.

NOSS, R. F. *et al.* How global biodiversity hotspots may go unrecognized: lessons from the North American Coastal Plain. **Diversity and Distributions**, Oxford, v. 21, n. 2, p. 236-244, 2015.

NUNES, E. D.; CASTRO, S. S. de. Degradation of Phytophysionomies of Cerrado and linear water erosive impacts in southwestern Goiás – Brazil. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 33, p. e60606, 2021.

- NUÑEZ-PEÑALOZA, J. L.; PÉREZ-NIETO, J.; PRADO-HERNÁNDEZ, J. V. Analysis of soil quality indicators and indices in Mexico. **Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas**, Texcoco, México, v. 14, n. 6, p. e3148, 2023.
- OLIVEIRA, E. R. *et al.* Technology and degradation of pastures in livestock in the Brazilian Cerrado. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 32, p. e55795, 2020.
- OLIVEIRA, M. C. *et al.* Sobrevivência e crescimento de espécies nativas do Cerrado após semeadura direta na recuperação de pastagem abandonada. **Neotropical Biology and Conservation**, Curitiba, v. 14, n. 3, p. 313-327, 2019.
- PALMA, A. C.; LAURANCE, S. G. W. W. A review of the use of direct seeding and seedling plantings in restoration: what do we know and where should we go?. **Applied Vegetation Science**, Hoboken, NJ, v. 18, p. 561-568, 2015.
- R CORE TEAM. **An Introduction to R: Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics**. Version 4.5.2. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.
- ROCHA, G. M. *et al.* Atributos físicos do solo de florestas urbanas como indicadores de degradação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 30, n. 3, p. 767-778, 2020.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Soil quality and sustainability of agricultural systems. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, RS, v. 27, p. 29-48, 2003.
- RODRIGUES, G. B.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 11, n. 1, p. 73-80, 2007.
- RODRÍGUEZ-LEÓN, C. H. *et al.* Soil Quality Restoration during the Natural Succession of Abandoned Cattle Pastures in Deforested Landscapes in the Colombian Amazon. **Agronomy**, Basel, v. 11, p. 2484, 2021.
- SARTORI, M. A.; COELHO, G. T. da C. P. Utilização de indicadores biológicos e uso de retentores de sedimentos na restauração florestal e recuperação de áreas degradadas. **Revista Maestria**, Sete Lagoas, v. 18, p. 67-76, 2023.
- SCHWAMBACK, D. *et al.* Land use transformations in the Brazilian Savanna: A decade of soil erosion and runoff measurements. **Catena**, Amsterdam, v. 246, p. 108412, 2024.
- SHARMA, S. *et al.* Soil Quality Indicators: A Comprehensive Review. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 35, n. 22, p. 315-325, 2023.
- SILVA, G. J. *et al.* Análise multivariada da resistência à penetração em solo sob pastagem degradada. **Ciencia del Suelo**, Buenos Aires, v. 38, n. 2, p. 236-248, 2020.
- SILVA, K. P. da *et al.* Indicadores de qualidade do solo em área degradada na Amazônia: um estudo na Volta Grande do Xingu. **Brazilian Geographical Journal**, Uberlândia, MG, v. 15, n. 2, p. 117-129, 2024.

SILVA, L. F.; SOUZA, B. I.; BACANI, V. M. Análise e comparação do índice de umidade superficial do solo na identificação de ambientes degradados e preservados em unidades de conservação na região dos Cariris Velhos/PB, semiárido brasileiro. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 25, n. 102, p. 01–20, 2024.

SLIM, S. *et al.* Assessment of soil surface scarification and reseeding with sulla (*Hedysarum coronarium* L.) of degraded Mediterranean semi-arid rangelands. **African Journal of Range & Forage Science**, Pretória, v. 38, n. 1, p. 99-108, 2021.

TEIXEIRA, D. S. *et al.* Response of vegetation to sheep dung addition in a degraded Cerrado area. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 23, n. 1, p. 47-52, 2019.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos e análises de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574 p.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER JR, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

TOSO, L. D. *et al.* Fauna Associated with Brushwood Transposition in a Mining Area in the South of Brazil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 27, n. 3, p. e20180206, 2020.

WEI, Y. *et al.* Dynamic study of infiltration rate for soils with varying degrees of degradation by water erosion. **International Soil and Water Conservation Research**, Amsterdam, v. 7, p. 167-175, 2019.

XIAO, Y. *et al.* Impacts of Large Hydropower Projects on the Ecological Environment of Watersheds: A Case Study of Ertan Reservoir Area. **Sustainability**, Basel, v. 16, p. 9125, 2024.

XIE, H. *et al.* A Bibliometric Analysis on Land Degradation: Current Status, Development, and Future Directions. **Land**, Basel, v. 9, p. 28, 2020.

ZAGO, V. C. P.; BRITO, M. B. G.; LELLIS, Í. C. e. Uso de resíduos de mineração em associação com leguminosas herbáceas e composto de bio-resíduos para restauração de solos degradados. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 46, n. Especial 1, p. 148-153, 2023.

ZHANG, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1024-1030, 1997.

## 7 APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO DO MIX DE SEMENTES NATIVAS

**Quadro 1** – Lista das sementes de 35 espécies nativas utilizadas no mix de sementes introduzido na área. Quantidade (número ou peso) por parcela.

Espécie	Família	Hábito	Quantidade
<i>Annona crassiflora</i> Mart.	Anonaceae	Arbórea	6
<i>Astronium fraxinifolium</i> Schott	Anacardiaceae	Arbórea	300
<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	Fabaceae	Arbórea	27
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. Ex Steud.	Boraginaceae	Arbórea	500
<i>Dilodendron bipinnatum</i> Radlk.	Sapindaceae	Arbórea	20
<i>Dipteryx alata</i> Vogel	Fabaceae	Arbórea	8
<i>Eriotheca pubescens</i> (Mart.) Schott & Endl.	Malvaceae	Arbórea	3
<i>Handroanthus ochraceus</i> (Cham.) Mattos	Bignoniaceae	Arbórea	400
<i>Himatanthus obovatus</i> (Müll.Arg.) Woodson	Apocynaceae	Arbórea	6
<i>Hymenaea stigonocarpa</i> Mart. Ex Hayne	Fabaceae	Arbórea	10
<i>Kielmeyera coriacea</i> (Spreng.) Mart.	Clusiaceae	Arbórea	6
<i>Lafoensia pacari</i> St. Hill	Lythraceae	Arbórea	20
<i>Leptolobium dasycarpum</i> Vogel	Fabaceae	Arbórea	90
<i>Leptolobium elegans</i> Vogel	Fabaceae	Arbórea	150
<i>Mabea fistulifera</i> Mart.	Euphorbiaceae	Arbórea	35
<i>Machaerium acutifolium</i> Vogel	Fabaceae	Arbórea	120
<i>Magonia pubescens</i> A.St.-Hil.	Sapindaceae	Arbórea	38
<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	Fabaceae	Arbórea	160
<i>Qualea parviflora</i> Mart.	Vochysiaceae	Arbórea	4
<i>Stryphnodendron polyphyllum</i>	Fabaceae	Arbórea	100
<i>Tachigali aurea</i> Tul.	Fabaceae	Arbórea	56
<i>Terminalia argentea</i> Mart. & Zucc.	Combretaceae	Arbórea	35
<i>Alibertia edulis</i> (Rich.) A.Rich.	Rosaceae	Arbustiva	4
<i>Anemopaegma arvense</i> (Vell.) Stellf. Ex de Souza	Bignoniaceae	Arbustiva	4
<i>Bauhinia holophylla</i> (Bong.) Steud.	Fabaceae	Arbustiva	2,5 g
<i>Campomanesia</i> sp.	Myrtaceae	Arbustiva	8 frutos
<i>Cochlospermum regium</i> (Mart. Ex Schrank) Pilg.	Bixaceae	Arbustiva	45
<i>Diospyros hispida</i> A.DC.	Ebenaceae	Arbustiva	5
<i>Heteropterys byrsonimifolia</i> A.Juss.	Malpighiaceae	Arbustiva	1,6 g
<i>Solanum lycocarpum</i> A.St.-Hil.	Solanaceae	Arbustiva	20
<i>Vernonanthura polyanthes</i> (Sprengel) Veja & Dematteis	Asteraceae	Arbustiva	0,1 g
<i>Crotalaria pallida</i> Aiton	Fabaceae	Herbácea	2,7 g
<i>Crotalaria spectabilis</i> Röth	Fabaceae	Herbácea	0,2 g
<i>Eriosema longifolium</i> Benth.	Fabaceae	Herbácea	0,5 g
<i>Syagrus romanzoffiana</i> (Cham.) Glassman	Arecaceae	Palmeira	10

Fonte: Elaboração da própria autora.